岸壁に入射する津波の反射・遡上特性と 小型船舶の打上げ・漂流挙動に関する研究

Study on Reflection and Run-up of Tsunami due to Quay and Behavior of Vessels

水谷法美¹·小池 竜²·中村友昭³·子安友加里⁴

Norimi MIZUTANI, Toru KOIKE, Tomoaki NAKAMURA and Yukari KOYASU

This paper investigates the reflection of a tsunami due to a quay wall and the behavior of a drifted vessel due to the tsunami by using hydraulic experiments and a numerical model based on MARS with the body force type of IB method. A reflection coefficient is evaluated by considering the difference between water surface elevations in the presence of the wall and those in the absence of the wall. It is found that the height of the wall has a great influence on the reflection, and hence the tsunami run-up. When the vessel is run up over the wall, it is drifted at the velocity faster than the fluid velocity. On an apron behind the wall, it is drifted at the almost same velocity as the fluid velocity. It is also revealed that the vessel can be run up on the apron when the water depth at the wall is larger than the draft of the vessel.

1. はじめに

津波来襲時には、人的被害や構造物などの浸水・損壊 被害に加え、壊れた構造物の部材などが遡上波によって 流され、背後の施設などに衝突するといった漂流衝突被 害も懸念されている.特に、港や臨港地区では船舶や荷 役貨物など漂流可能なものが多く、その対策が望まれる.

津波による漂流物に関する研究はいくつか行われており (例えば,廉ら,2007,2008;稲垣ら,2008),船舶に関 しても比較的大きい船を対象に検討されている(例えば, 藤井ら,2007;増田ら,2008).しかし,陸上への打上げ が容易で危険性が高いと危惧される小型船舶に関してはほ とんど検討されておらず,その打上げや漂流挙動の特性に ついては詳しく解明されていないのが現状である.

本研究は,エプロン先端部分における津波の反射・遡 上挙動に関する特性に加え,津波来襲時の小型船舶の打 上げと漂流挙動を,水理模型実験とMARSに基づく3次元 数値波動水槽に体積力型埋め込み境界法を組み込んだ流 体・構造連成数値シミュレーションを用いた数値計算の 両面から考究するものである.

2. 水理模型実験

(1) 実験装置および実験条件

模型実験を、2次元造波水槽(全長30m、全幅0.7m、高

1	正会員	工博	名古屋大学教授 大学院工学研究科社会
2	正会員	修(工)	基盤上字專攻 清水建設(株) 土木東京支店千葉土木営 業可
3	正会員	博(工)	*/// 名古屋大学特任講師 高等研究院 住古ナココテリアルハンドリング(株)
4			技術部開発第一G

さ0.9m)に長さ400cm, 天端高2.5cmのエプロン模型を設 置して行った. 縮尺を1/40とし, エプロン前面水深を 11.5cmとし, その前面には緩勾配斜面(海底勾配1/10, 岸沖長さ400cm)と急勾配斜面(海底勾配1/10, 岸沖長さ 290cm)を設置した(図-1参照).

ピストン型造波装置により,津波を模擬した押波初動 の長周期波(正弦波半周期分,波高*H*_i:1.3~4.0cm,造 波周期*T*:7.5~15s,以下津波と称する)を生起させた. 船舶模型は,アクリルを用いて船底形状を平底型(flat) と角底型(hull)の2種類作製し,それぞれに対して質量



12<u>1</u> 69.4[°] 図-2 船舶模型の概要

(unit: mm)

表-1 船舶模型の諸元

総称	G1		G2	
諸元	質量(g)	吃水(cm)	質量(g)	吃水(cm)
平底(f)	93.14	0.73	170.34	1.33
角底(h)	93.14	1.33	170.34	1.93

を2種類ずつ変化させた(図-2,表-1参照).

船舶模型の初期設置位置 x_0 (エプロン前面から船舶岸側 端までの距離)を0cm, 10cmとし,初期設置向きをエプロ ン前面に対し,縦置き (Perpendicular)と横置き (Parallel) の2種類を対象とした.

なお、実験はすべての条件で3~5回繰り返し実施した.

(2) 数值計算手法

MARSに基づく3次元数値波動水槽に体積力型埋め込み 境界法を組み込んだNakamuraら(2008)の計算手法を用 いて計算を行った.同手法では物体を各計算格子に占め る物体体積率 $F_{ob}(0 \le F_{ob} \le 1)$ で表し,その体積率を基に物 体内部の速度を強制する.流体の速度を v_i^{f} ,物体の速度を $v_i^{ob} = u_i^{ob} + e_{ijk} \omega_j^{ob} r_k^{ob}$ (u_i^{ob} :物体の並進速度; ω_i^{ob} :物体の角 速度; r_i^{ob} :物体重心からの相対位置ベクトル; e_{ijk} :置換 記号)としたとき体積平均速度を $v_i = (1-F_{ob})v_i^{f} + F_{ob}v_i^{ob}$ と定 義すると,本手法の運動方程式は,

となる. ただし, pは圧力, g_i は重力加速度ベクトル, $\hat{\rho} = (1-F_{ob}) \{F\rho_w + (1-F)\rho_a\} + F_{ob}\rho_{ob}$ は密度, ρ_w , ρ_a , ρ_{ob} はそれ ぞれ水, 空気, 物体の密度である. なお, 詳細について はNakamuraら (2008) を参照されたい.

時間発展計算にSMAC法と3次精度Adams-Bashforth法 を適用すると、運動方程式(1)は以下のように書ける.



ここで,式(2)は予測段階の第1ステップ,式(3)は 予測段階の第2ステップ,式(4)は修正段階である.SMAC 法の予測段階の第1ステップで求められる物体内部の流速 の予測値 v_i^{p1} が物体の速度 v_i^{obn} になるようにすると,物体と の相互作用力 f_i^{obn} は式(5)のように表すことができる.な お,下添字iは方向を,上添字nは時間ステップを示す.

$$f_i^{obn} = F_{ob}^n \frac{v_i^{obn} - v_i^{p_1}}{\Delta t^{n+1/2}}$$
(5)

よって、予測段階の第2ステップは、

となり,式(4)の両辺をx_iで微分した圧力方程式を解く ことによって,流体が物体から受ける力を考慮した解析が 可能である.自由表面の位置の更新に際しては、MARSに よるVOF関数Fの移流計算を行った.その後、物体内部の 圧力を用いて作用力を算出するXiaoら(1997)の手法に より物体の並進・回転運動を計算し、それに基づいてF_{ob} の更新を行った.ただし、Xiaoら(1997)と異なり、物 体の並進・回転運動の時間発展計算にはNewmarkのβ法を 採用した.また、物体の位置からのF_{ob}の計算には、Yuki ら(2007)のtanh関数による近似ではなく、各格子の中心 から物体を構成する平面までの垂線の距離を基に算出する ことで物体の総体積の増減を抑えた.なお、移動物体と不 透過構造物との境界条件にはペナルティ法を導入した.

a) 波動場のみの計算領域

本研究では、数値計算を疑似の数値波動水路を用いて 実施した.図-3に数値波動水路を示す.エプロンの長さ を数値波動水路の岸側端まで延長していることを除いて、 図-1と同様である.エプロンの岸側端の境界には勾配ゼ ロの開境界条件を用いた.計算格子の幅はエプロン上に 設定した0.25cm×0.8cmが最も細かく、その他の場所では 格子数削減のため、不等間隔格子を採用した.

b) 漂流シミュレーションの計算領域

物体の並進や回転を精度良く解析するため,エプロン 護岸周辺の格子に比較的小さな格子幅(0.2cm×0.2cm) を用いて計算を行った.今回も不等間隔格子を用いてい るが,実験で使用した造波水路全体を数値計算上で再現 し解析を行うことは,格子数が非常に多くなり計算負荷 が大きくなるため,計算領域をエプロン護岸周辺に限定 した.図-4に計算領域の概略図を示す.なお,この小領 域に入射させる波の再現性は実験値との比較により確認 できている.

3. 津波の反射と遡上

津波による船舶の打上げなどの現象は津波そのものの陸 上への遡上と密接に関係しており,同時に岸壁からの反射 とも関連すると考えられる.しかし,津波のような波長の 長い波の反射を定量的に検討した研究はあまりなく,その 知見はほとんどない.そこで本研究では,数値解析手法に





図-5 反射率K_rと入射波峰高H_iの関係

よって津波の岸壁からの反射特性について考察する.

津波に対する入反射分離法が確立されていないため、本 研究では、エプロンを設置していないときの波を入射波と し、エプロンを設置した状態での波との差を反射波とし、 数値計算から反射率を求めた.具体的には、エプロン前面 から沖側10cmにおける入射波の波峰高η_iと反射波の波峰 高η_rの比η_./η_iを反射率K_rとした.図-5に入射波峰高H_iの 増加にともなう反射率K_.の変化を例示する.図より、入射 波は周期によらず、波峰高が天端高(R=2.5cm)より小さ いときは岸壁で完全反射し、K_.はほほ1.0になるが、波峰 高が天端高より大きくなるとエプロン上に遡上しはじめ、 反射率は1より小さくなる.そして、その傾向は入射波の 波峰高が大きいほど顕著になる.この結果は、天端高を増 すことによって反射率を大きくし、遡上波を軽減できるこ とを示唆するものであり、紙面の都合上図示できないが、 数値計算からもその効果は確認された(水谷ら、2009).

4. 船舶の漂流特性

(1) 船舶の漂流挙動

図-6にビデオ画像から求めた岸壁前面の船舶の漂流挙



動の一例を示す.図-6(a)は船舶模型上面の軌跡を、図-6 (b) は船舶の漂流速度のx軸方向成分の空間変化をそれ ぞれ示している.岸壁に波が入射すると,岸壁からの反 射波の影響によりエプロン前面の水位が急激に上昇し, そ れにともなって船舶も上昇する.そして,船舶の底面が 天端を超えると、波とともにエプロン上に流れ込むよう に遡上する. 遡上後は、次第に速度変化が小さくなって ほぼ一定の速度で漂流していく、図-7に例示したエプロ ンへの遡上時の波形と流速ベクトルの計算結果や、図-8に 示す波表面付近の水平流速の最大値の空間変化から, 岸 壁の手前で流速ベクトルが上方を向き、水位が天端を超 え波が遡上すると,内陸側に流速ベクトルが卓越すると ともに、流速も急激に大きくなることがわかる.また、そ の最大流速はx=10cm以降ほぼ一定値となる.これらの流 動特性は、船舶の漂流挙動と非常に類似しており、した がって船舶の挙動は遡上波の流動場に大きく支配されて いることがわかる.

(2) 船舶の漂流速度

図-9にエプロン上に打上げられた船舶の漂流速度V_xの 空間分布を示す.表-1に示した模型のうちG1-f,G1-h, G2-fはいずれの場合もほぼ同じ速度で遡上し,エプロン 上を進行していくことがわかる.そして,G2-fの船舶は x=100cm,G1-hの船舶はx=150cmを過ぎると船底がエプロ ンに接触し,急激に減速していく.G2-hの船舶に関して は,エプロン遡上直後にエプロン上面に接触したため,他 の船舶と漂流挙動に差が生じている.ただし,エプロン 上面に接触するまでは他の船舶とほぼ同じ挙動を示して いる.これらの結果より,船舶の漂流速度には形状の影



響はあまりないが、吃水が大きくなってエプロンと船底 との接触が容易に起こるようになると、漂流挙動に大き く影響を与えるといえる.なお、減速後であっても、船 舶背後の水位が高くなると再浮上し、再度加速される場 合(G2-f)も確認されている.

図-10は、エプロン上での最大流速と船舶が同位置を漂 流する際の速度との関係を示したものである.図は、比 較的エプロン上面との接触が生じにくいG1-fの結果で、漂 流速度が減少する接触が生じたケースは除外してある.同 図より、エプロン上の漂流船舶は、ほぼ各点での遡上波



の流速で漂流するといえる.一方,岸壁前面の漂流速度 と波の表面流速の関係を示す図-11より,岸壁のごく近傍 では流速より船舶の漂流速度が大きくなる結果が得られ た.この原因については後述する.

(3) 漂流シミュレーション

つぎに津波の入射によりエプロン上に遡上する船舶の漂 流挙動現象について,計算結果と実験結果を比較し,本計 算手法の妥当性を検証する.図-12にその比較例を示す. 同図(a)は重心位置の軌跡を,同図(b)は鉛直変位にと もなう漂流速度の変化をそれぞれ示す.船舶底面が天端を 超えると岸側へ漂流し始めること,津波の入射にともなっ て船舶が上方へ加速していく際の速度変化などが良好に再 現できており,本計算手法の有効性が確認できる.

船舶がエプロン上に打上がる場合の計算結果を図-13に 例示する.津波がエプロン上に遡上する際,図-7に示し たように波面がエプロン奥部に向かって大きな勾配を持 ち,船舶もそれにともなって前傾する(図-13参照).等 圧面も水面とほぼ平行になるため,船舶に作用する浮力 は鉛直上方から前傾した方向に作用することになる.こ の浮力の作用のために船舶が加速され,図-11に示したよ うに表面流速よりも船舶の漂流速度が速くなったと考え られる.

5. 船舶の遡上限界

漂流船舶への対策を考える上で,船舶が海域から陸域 へ打上げられる条件を明らかにしておくことが重要であ





30

40 50 60

> 20

10

0

0 10 20



る. そこで本研究では、岸壁直前に設置した船舶を対象 に,比較的小さな入射波から波峰高を増大させながら実 験を繰り返し、船舶がエプロン上へ打上げられる条件に ついて考察を行った. 図-14にその結果を示す. 図中, エ プロン前面の波峰高をHo,船舶の吃水をDとしている.し たがって,縦軸の(H₀-R)/Dが1.0の場合,岸壁上の越流水 深が吃水に一致することになる. なお, 図には計算結果 も併せて示してある.図より、ほぼ吃水が越流水深を超 えると船舶は遡上し始めることが実験と計算の両面から 確認できる.図には、初期位置が横置きの条件のみを示 しているが、縦置きの場合でも同様の結果が得られてい る.ただし、横置きで船底形状が角底の場合では、それ よりも比較的小さな波でも遡上する傾向が見られた。こ れは、船舶前面側の底面がエプロン前面に接触すること により、y軸周りの回転運動が生じ、遡上しやすくなるた めであると考えられる (図-15参照). そのため, 船底形 状によっては吃水と越流水深のみによる判断は、危険側 になる可能性があるといえる.

6. 結論

本研究で得られた主な結果を以下に要約する.

- 1) 岸壁に入射する津波の反射率K_rは,岸壁天端高と波峰 高の関係によって変化する.
- 2) 船舶の漂流挙動は周辺の流動場の影響を受け、エプロン上ではほぼ遡上波の流速で漂流する.ただし、エプロン上への遡上時に急勾配の波面上に船舶が乗った場合には、流速よりも速い速度で漂流する場合があることが判明した.
- 3)船舶の漂流現象を対象にMARSを用いた数値解析を行った結果,船舶の打上げ挙動を良好に再現可能であることを確認した.



4)船舶は、ほぼ越流水深が吃水より大きくなると遡上することが判明した.ただし、船舶の回転運動が遡上を助長する効果があることも確認された.

最後になるが、本研究は(独)日本学術振興会科学研究 費補助金(基盤(B);課題番号:19360222;代表者:水 谷法美)により行われたことを附記し、感謝の意を表する.

参考文献

- 稲垣 聡・池谷 毅・大森政則・藤井直樹・向原 健・畑山 健(2008):津波による屋外タンクの滑動・漂流実験および予測手法の提案,海岸工学論文集,第55巻, pp.276-280.
- 藤井直樹・福山貴子・稲垣 聡・池谷 毅・柳沢 賢・大森政 則(2007) :津波による漂流挙動の変動性に関する実験と 評価方法の提案,海岸工学論文集,第54巻, pp.241-245.
- 増田光一・居駒智樹・増田光弘・鈴木雄太(2008):津波来 襲時の岸壁近傍の船舶の挙動解析に関する研究,海洋工 学シンポジウム論文集, CD-ROM.
- 水谷法美・中村友昭・子安友加里・廉 慶善(2009) :岸壁 に入射した津波の反射と遡上に関する研究,土木学会第 64回年次学術講演会論文集,II-79, pp.157-158.
- 廉 慶善・水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富 田孝史(2007):陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙 動と漂流衝突力に関する研究,海岸工学論文集,第54巻, pp.851-855.
- 廉 慶善・中村友昭・字佐美敦浩・水谷法美(2008):流 体・構造連成解析による漂流コンテナの衝突力の算定に 関する研究,海岸工学論文集,第55巻,pp.281-285.
- Nakamura, T., Y. Kuramitsu and N. Mizutani (2008): Tsunami scour around a square structure, Coastal Eng. J., JSCE, Vol. 50, No. 2, pp. 209-246.
- Xiao, F., T. Yabe, T. Ito and M. Tajima (1997): An algorithm for simulating solid objects suspended in stratified flow, Comp. Phys. Com., Elsevier, Vol. 102, pp. 147-160.
- Yuki, Y., S. Takeuchi and T. Kajishima (2007): Efficient immersed boundary method for strong interaction problem of arbitrary shape object with the self-induced flow, J. Fluid Sci. Tech., JSME, Vol. 2, No. 1, pp. 1-11.

